

사각재 인발 공정의 코너채움에 관한 연구

김용철*, 김영식(부산대 원), 김병민(부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터)

A Study on the Corner Filling in the Drawing of the Rectangular Rod

Y. C. Kim*, Y. S. Kim(Graduate School, PNU), B. M. Kim(ERC for NSDM, PNU)

Abstract

In the present study, in order to investigate the effect of the corner filling in the drawing of the rectangular rod from a round bar, the drawing of the square rod from a round bar has been simulated by using rigid-plastic finite element method and artificial neural network has been introduced to reduce the number of simulation. The experimental investigation has been also implemented to verify the efficiency of the application of results of present and previous study. According to the results of present and pervious study, the combination of semi-die angle gives a great effect on the corner filling in case of the irregular shaped drawing process, but, in case of the regular shaped drawing process, the main process variable on the corner filling is reduction in area.

Keywords : FEM(유한요소법), Drawing of Rectangular Rod(사각재 인발), Corner Filling(코너채움), Reduction in Area(단면적 감소율), Semi-die Angle(다이 반각), Neural Network(신경망)

1. 서론

최근, 정사각형, 직사각형, 타원형 등의 비정다각형 단면을 가진 제품들이 전기제품에 많이 쓰이는 연결핀, 변압기의 평케이블 등에 많이 사용되어지고 있다. 또한 금·은 등의 귀금속, 좁은 공간에서 높은 강성을 필요로 하는 각재 스프링 등에 대한 수요가 높아져 이형재 인발에 관한 관심이 높아지고 있다. 제품의 치수 정도의 측면에서 이형재 인발에서는 최종 제품의 코너채움이 아주 중요하다.

이형재 인발 공정에 대한 실험 및 이론적 연구들이 행해져왔다. Basily등[1]은 원형봉에서 정다각형 단면형상의 인발 공정에 대한 상·하계해를 이용하여 정다각형 단면의 인발 공정에 대한 최적의 금형 형상을 제시하였다. Webster등[2]은 이차요소를 사용하여 정상상태 유한요소 해석을

수행하였으며, 상계해와 비교하였다. Yoshida등[3]은 원형봉에서 육각봉의 인발 공정에 대해 상용 비선형 유한요소 해석 코드인 MARC를 이용하여 해석을 수행하고, 실험과 비교하였다. Kim등[4]은 이형재 인발 공정의 유한요소 해석을 위한 선형원추형 인발 금형 형상을 수학적으로 정의하고, 초기 요소망 구성방법을 제안하였고, 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 원형봉에서 정사각형 단면의 인발 공정에 대한 성형한계 및 코너채움에 대한 연구를 수행하였다.

이전 연구[5]에서는 직사각재 인발 공정에 대해 동일한 마찰조건, 직사각형 비(1.5)에 대해 짧은 변과 긴 변의 다이 반각과 단면적 감소율을 변화시켜 각각의 다이 반각과 단면적 감소율이 코너채움에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구에서는 이전 연구[5]에서 계속하여 직사각형 비가 1.0인 정사각재 인발 공정에 대해

동일한 마찰조건에 대해 다이 반각과 단면적 감소율을 변화 시켜 다이 반각과 단면적 감소율이 코너채움에 미치는 영향을 3차원 강소성 유한 요소법을 이용하여 조사하였으며, 이론적 연구 내용을 실제 사각 단면 연결핀 제품에 적용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유한요소 정식화

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수, K 를 도입한 강소성 재료에 대한 범함수의 일차변분은 다음과 같다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \bar{\epsilon}_v \delta \bar{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

2.2 신경망의 적용

본 연구에서는 정사각재 인발 공정에서 다이 반각과 단면적 감소율이 코너채움에 미치는 영향을 조사하기 위하여 개발된 3차원 이형재 인발 공정 유한요소 프로그램을 이용하였으며, 유한요소 해석 회수를 줄이기 위하여 역전파 학습 알고리즘의 다층 퍼셉트론 신경망[6]을 적용하였다.

3. 유한요소 모델링 및 신경망의 적용

3.1 유한요소 모델링

유한요소 해석에 사용된 재료는 AISI 1045강이며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 953.37 \bar{\epsilon}^{0.14} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

해석에 사용된 금형 형상은 Fig. 1과 같다.

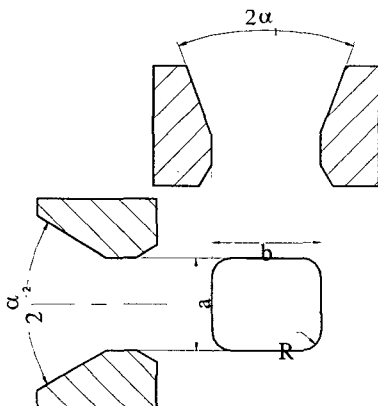


Fig. 1 The exit cross-sectional shape of the die for simulation

본 연구에서는 직사각형 비가 1.0인 원형봉에서 정사각재의 인발 공정을 조사하였으며, 본 연구에서 해석에 사용된 정사각재 인발의 출구 형상은 이전 연구[5]에서 사용된 금형의 출구 면적과 같은 면적을 가진 형상으로 $a=b=1.40\text{mm}$ 로 하였다. 다이 반각은 이전 연구[5]의 직사각형 금형과는 달리 같은 값이 되고, 본 연구에서는 $5^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$ 범위에서 고려하였으며, 단면적 감소율은 각각 20%, 25%로 해석을 수행하였다. 공정조건을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Drawing process conditions of rectangular section for simulation

Rectangular ratio	Friction factor m	Die exit corner radius r (mm)	Die radius R (mm)	Bearing length (mm)
1.0	0.1	0.3	0.25	0.6

3.2 신경망을 이용한 미충만 출구 면적 예측

Table 2에는 각각의 단면적 감소율에 대한 유한요소 해석 수행조건을 나타내었다. 다이 반각은 고려된 범위에서 5등분을 하였으며, 각각의 단면적 감소율에 대해 5번의 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 결과의 미충만 출구 면적을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

4. 해석 결과 및 고찰

다이 반각을 신경망의 입력값으로 하고 미충만 출구 면적을 출력값으로 신경망 학습을 수행하여, 임의의 다이 반각 조합($4^\circ \leq \alpha_1 = \alpha_2 \leq 26^\circ$) 이 갖는 미충만 출구 면적을 예측하였다. Fig. 2는 신경망 학습 결과를 보여주고 있다. 등근 점은 유한요소 해석 데이터이고, 선은 이 데이터를 학습 데이터로 학습시킨 신경망 결과이다.

Fig. 2에서 단면적 감소율이 증가함에 따라 코너채움이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

Yoshida등[3]의 연구와 Kim등[4]의 연구에서 정다각재 인발의 경우 단면적 감소율이 증가함에 따라 코너채움이 잘 이루어졌으며, 각 단면적 감소율에 대해 코너채움이 잘 이루어지는 다이 반각이 존재하였으며, 이 다이 반각은 단면적 감소율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 본 연구에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었으며,

Table 2 The condition of FE-simulation and the input data of neural network.

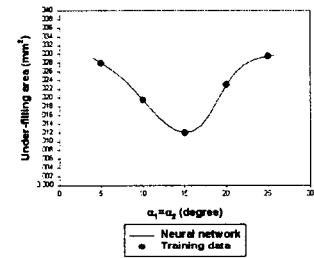
(a) 20% Reduction in area

Trial no.	Neural network(Input data)			Drawing stress (N/mm^2)
	Input layer		Output layer	
	α_1 (degree)	α_2 (degree)	under-filling area (%)	
1	5	5	1.49	318.49
2	10	10	1.03	275.17
3	15	15	0.64	282.37
4	20	20	1.22	324.38
5	25	25	1.57	364.32

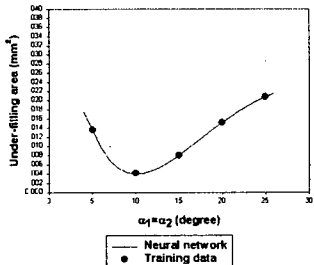
(b) 25% Reduction in area

Trial no.	Neural network(Input data)			Drawing stress (N/mm^2)
	Input layer		Output layer	
	α_1 (degree)	α_2 (degree)	under-filling area (%)	
1	5	5	0.72	337.02
2	10	10	0.21	331.24
3	15	15	0.42	346.18
4	20	20	0.81	386.60
5	25	25	1.10	410.70

이전 연구[5]와 비교하여, 정다각재 인발 공정의 경우, 다이 반각보다 단면적 감소율이 코너채움에 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 하지만 직사각재와 같은 비 정다각재 인발 공정의 경우, 단면적 감소율보다 다이 반각이 코너채움에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.



(a) Reduction in area, 20%



(b) Reduction in area, 25%

Fig. 2 Outputs of neural network using test data in drawing process

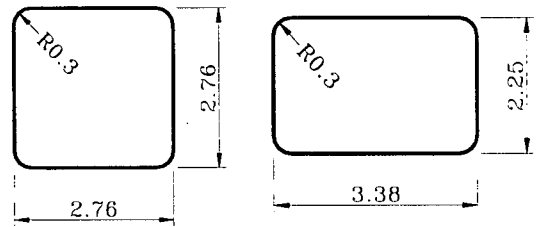
5. 실험 및 고찰

5.1 실험 조건 및 금형 형상

본 연구와 이전 연구[5]의 결과를 실제 연결편으로 사용되고 있는 제품에 적용시켜 보았다.

실험에 사용된 소재는 AISI 1045 강이며, 본 연구에서는 직사각형 비 1.0, 1.5를 갖는 사각재 인발 공정에 관한 실험을 수행하였으며, 사용된 금형의 치수는 Fig. 2와 같다.

모든 직사각형 비에 대해 단면적 감소율 30%와 40%를 고려하였으며, 다이 반각의 경우 직사각형 비 1.0일 경우 $\alpha_1 = \alpha_2 = 15^\circ$ 를 고려하였으며, 직사각형 비 1.5일 경우, 이전 연구[5]에서 얻어진 결과를 바탕으로 단면적 감소율 30%와 40%에 대해 각각의 최적 다이 반각인 $\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha_2 = 12^\circ$ 와 $\alpha_1 = 8^\circ$, $\alpha_2 = 15^\circ$ 로 고려하였다.



(a) Rectangular ratio = 1.0 (b) Rectangular ratio = 1.5

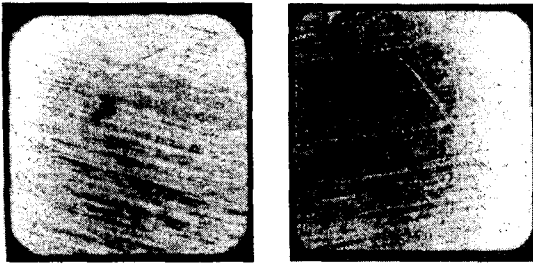
Fig. 3 The exit cross-sectional shape of the die for experiment

5.2 실험 결과 및 고찰

본 연구와 이전 연구[5]에서의 사각재 인발 공정에 대한 유한요소 해석 및 신경망 학습 결과를 실제 제품에 적용하기 위하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 각각의 소재의 코너 부 형상이 약간의 오차는 존재하지만, 소재들간의 코너채움에 대한 경향은 뚜렷이 나타나고 있다.

Fig. 4에서 직사각형 비가 1.0, 즉 정사각재 인발 공정의 경우 단면적 감소율이 30%에서 40%로 증가함에 따라 코너가 더 잘 채워져 감을 알 수 있다.

Fig. 5에서 직사각형 비가 1.5에 대하여 코너채움에 대한 경향을 살펴보면, 먼저 단면적 감소율이 30%일 경우, 다이 반각 조합이 $\alpha_1 = 10^\circ$,

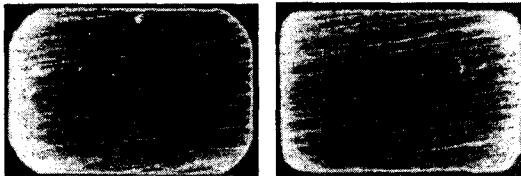


(a) R.A. = 30%, $\alpha = 15^\circ$ (b) R.A. = 40%, $\alpha = 15^\circ$

Fig. 4 Intermediate cross-section for the drawing of the square rod from a round bar



(a) R.A. = 30, $\alpha_1 = 8^\circ$ $\alpha_2 = 15^\circ$ (b) R.A. = 30, $\alpha_1 = 10^\circ$ $\alpha_2 = 12^\circ$



(c) R.A. = 40, $\alpha_1 = 10^\circ$ $\alpha_2 = 12^\circ$ (d) R.A. = 40, $\alpha_1 = 8^\circ$ $\alpha_2 = 15^\circ$

Fig. 5 Intermediate cross-section for the drawing of the rectangular rod from a round bar

$\alpha_2=12^\circ$ 일 경우가 이전 연구[5]의 단면적 감소율 40%에서의 최적의 다이 반각 조합인 $\alpha_1=8^\circ$, $\alpha_2=15^\circ$ 일 경우보다 코너부가 더 잘 채워졌음을 알 수 있다. 또한 단면적 감소율이 40%일 경우는 단면적 감소율 30%와는 달리 다이 반각 조합이 $\alpha_1=8^\circ$, $\alpha_2=15^\circ$ 일 경우, 코너 채움이 더 잘 이루어짐을 알 수 있다.

각각의 직사각형 비에 대해 비교하면, 직사각형 비가 1.0일 경우는 단면적 감소율이 코너채움에 많은 영향을 줄 수 있고, 직사각형 비가 1.5일 경우는 단면적 감소율보다는 다이 반각 조합이 코너채움에 더 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

이전 연구[5]에 연속하여 정사각재 인발 공정에 대해 단면적 감소율과 다이 반각이 코너채움에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유한요소 해

석을 수행하였으며, 유한요소 해석 회수를 줄이기 위하여 신경망을 도입하였다. 또한 이전 연구 [5]와 본 연구의 결과를 실제 제품의 인발 공정에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 정사각재와 같은 정다각재 인발 공정에 있어서 코너채움은 단면적 감소율에 많은 영향을 받는다.
- (2) 직사각재와 같은 비정다각 인발 공정의 경우 다이 반각의 조합이 코너채움에 많은 영향을 준다.
- (3) 이상의 결과를 바탕으로 실제 제품의 인발 공정에 적용하였으며, 이전 연구[5]의 결과가 타당함을 알 수 있다.

7. 참고문헌

- [1] B. B. Basily and D. H. Sansome, "Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section Rod from Round Bar", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 201-208, 1976.
- [2] C. R. Boër and W. D. Webster, Jr., "Direct Upper-Bound Solution and Finite Element Approach to Round-To-Square Drawing", *Trans. of ASME*, Vol. 107, pp. 254-260, 1985.
- [3] Kazunari Yoshida, Shiro Yamada, Seiichiro Suzuki, Kazuhiro Maeda, "Mechanics of Deformation in Round-to-Hexagon Drawing by FEM", 第45回塑性加工連合講演會 pp.161-164, 1994.
- [4] 김호창, 김용철, 최영, 김병민, "강소성 유한요소법을 이용한 원형봉에서 정사각재 인발공정에 관한 연구", 정밀공학회, 제 15권 제 11호, pp. 145~151, 1998.
- [5] 김용철, 최영, 김철, 김병민, "직사각재 인발공정의 유한요소 시뮬레이션", 소성가공학회 1998년도 추계 학술대회 논문집, pp. 218-221, 1998
- [6] D. J. Kim, B. M. Kim, J. C. Choi, "Determination of the initial billet geometry for a forged product using neural networks", *Int. J. Materials Processing Technology*, Vol. 72, pp. 86-93, 1997.